대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 B pp. 479~484 KSME 00F193

아음속/초음속 증기 이젝터에 관한 실험적 연구

김희동*· 최보규**· 이준희*

An Experimental Study of the Subsonic/Supersonic Steam Ejectors

Heuy-Dong Kim, Bo-Gyu Choi, and Jun-Hee Lee

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Subsonic Ejector(아음속 이젝터), Supersonic Ejector (초음속 이젝터), Shock Wave(충격파), Flow Choke(유동 초크)

Abstract

For the purpose of a cost effective design of practical subsonic/supersonic ejector systems, an experiment was carried out using a superheated steam as a primary driving flow. The superheated steam jet was produced by several different kinds of subsonic and supersonic nozzles. The secondary flow of atmospheric air inside a plenum chamber was drawn into the primary steam jet. The vacuum performance of the plenum chamber was investigated for a wide range of the ejector operation pressure ratio. The result showed that the static pressure of the mixed flow at the ejector throat is only a function of the ejector operation pressure ratio, regardless of the primary nozzle type employed.

1. 서 론

이젝터(ejector)는 고압의 유체를 노즐로 분출시켜, 그 분류 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 유체를 보다 높은 압력까지 압축하여 수송하는 장치이다. 이젝터는 노즐(nozzle), 혼합부(mixing section) 및 디퓨저(diffuser)로 구성[1]되어 있으며, 이젝터 시스템 전체에 어떤 회전부분이나 활동부분을 가지지 않는 유체기계이므로 고장이 적고, 소형임에도 불구하고 대용량의 유체를 압축 또는 수송 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

일반적으로 이젝터는 1차노즐로부터 방출되는 유동이 아음속(subsonic), 음속(sonic) 그리고 초음속(supersonic)인 경우 각각 아음속, 음속 및 초음속 이젝터로 분류된다. 또 1차노즐로부터 유체를 가속하여 2차 유체를 이송하거나 압축하게 되는 경우 1차노즐의 유동이 구동유체가 된다. 이 경우 구동유체가 공기이거나 증기 또는 물인 경우 각각 공기이젝터(air ejector), 증기이젝터(steam ejector) 그리고 물이젝터(water ejector)라고 한다.

대개의 경우 산업적 용도로 사용되는 이젝터에 있어서, 1차 노즐의 구동유체가 증기나 기타 압축성 기체인 경우에 대부분의 이젝터는 초음속 상태로 운전되며, 종래 이러한 초음속 이젝터들은 V/STOL항공기의 추력증강[2]이나, 로켓트엔진의 고고도상태(high altitude)의 모사,[3] 연소시험,[4] 천연가스 재생,[5] 식품제조,[6] 건조 및 탈취,[7] 소음저감[8] 그리고 각종 화학공업[9] 등에 널리 활용되어 왔다.

최근 들어 각종 건설기계, 중장비 및 전자장치들의 냉각,[10] 소음저감설비,[11] 환기 및 탈취,[12] 각종 유체수송 및 펌프[13] 등에 이젝터 시스템이 다양하게 활용되고 있으며, 이 경우 이젝터

* 회원, 안동대학교 기계공학부
** 회원, (주)동화정기

Fig. 2 Outlook of test rig

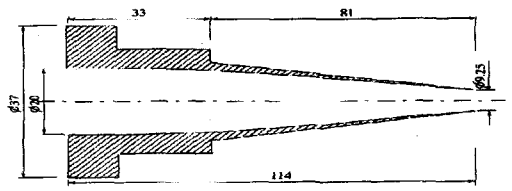
Table 1 Experimental conditions

Property	Subsonic		Supersonic		
	Nozzle 1	2	3	4	5
Primary working fluid	Superheated steam		Superheated steam		
Secondary working fluid	Atmospheric air		Atmospheric air		
Steam pressure(kPa)	150~400	150~250	400~1400		
Steam temperature(K)	384~424	384~400	424~470		

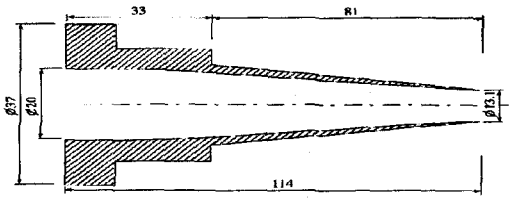
실험에서는 1차 정체실 상류에 설치한 압력 조절 밸브를 이용하여 1차 정체실의 과열증기의 압력을 조절하였으며, 2차 정체실의 초기압력은 대기상태의 압력이 되도록 설정하였다. 이젝터 유동의 계측은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 1차 정체실, 2차 정체실, 이젝터 입구, 1차 노즐출구, 이젝터의 목, 디퓨저 그리고 이젝터 출구 면에 직경 1.0mm의 정압공을 설치하였다. 또 1차 정체실에는 열전대를 이용하여 과열증기의 온도를 측정하였다. 압력측정은 디지털 압력측정계 및 고감도 압력 센서를 이용하여 퍼스널 컴퓨터로 모니터링 하여, 이젝터 내부 유동이 정상상태로 된 후에 수행하였다. 실험오차를 줄이기 위하여 본 연구에서는 동일한 조건에서 여러 차례 측정을 반복하여 측정값의 재현성을 확인하였다. 압력 측정에 이용된 압력계의 검증은 소형탱크를 진공상태로 하거나 가압상태로 하여, 출력값을 확인하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 이용된 실험장치의 외관을 보여준다. 이젝터 시스템은 청동으로 제작되었으며, 그림의 왼쪽에 1차 정체실 하류에 위치한 밸브가 보이며, 그 하류에 2차 정체실과 이젝터 입구의 연결부가 보인다. 유동은 그림의 왼쪽에서 오른쪽으로 향하며, 이젝터 출구에 설치된 소형 전압관을 볼 수 있다. Table 1에는 본 연구에서 적용된 실험조건을 요약하였다.

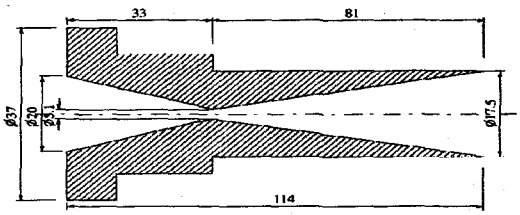
Fig. 3에는 본 연구에서 적용된 다섯 가지의 1차 유동의 구동노즐을 나타내었다. 실험에서는 전형적인 축소노즐의 형태인 Nozzle 1과 Nozzle



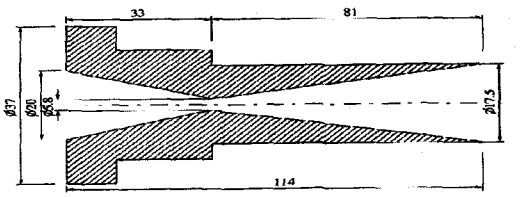
(a) Nozzle 1



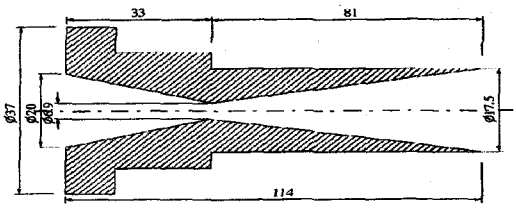
(b) Nozzle 2



(c) Nozzle 3



(d) Nozzle 4



(e) Nozzle 5

Fig. 3 Primary nozzle configurations(unit:mm)

2의 아음속 노즐과 축소·확대 노즐의 형태인 Nozzle 3, 4 그리고 5는 초음속 노즐의 형태를 보여준다. 따라서 Nozzle 1과 2가 1차 노즐로 사용되는 경우에는 아음속 이젝터 그리고 Nozzle

의 구동압력비가 비교적 낮으므로, 1차노즐 출구에서 유동은 아음속이거나 음속상태로 된다.

초음속 이젝터 유동에 비하여 현재까지 아음속 및 음속 이젝터 유동에 관한 연구결과는 많지 않다. 이것은 이젝터가 아음속 상태로 운전되는 경우, 이젝터 내부에서 발생하는 1차유동 및 2차유동의 혼합특성, 배기성능 및 진공성능 등의 이젝터 유동 특성들이 이젝터의 구동압력비에 강하게 의존하게 되므로, 단순한 이론적 수단으로 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하는 것은 용이하지 않기 때문이다. 또 부분적으로는 이젝터의 성능에 밀접하게 관계하는 1차노즐의 직경, 이젝터의 목직경, 혼합부의 길이, 디퓨저의 길이 등 초음속 이젝터 유동에 비하여 많은 특성길이가 존재하게 되므로, 아음속 이젝터 유동장을 해석하는 것은 매우 곤란하다.

최근 고속의 연산 능력을 갖춘 대형 공학계산기의 발달로, 이젝터의 유동장을 수치적으로 모사할 수 있게 되었으나[14,15,16], 이젝터 내부유동은 1차유동과 2차유동의 혼합, 충격파, 비정상성, 3차원성 등 매우 복잡하며[17], 이젝터 유동을 적절하게 모사하기 위한 난류모델의 개발 등 많은 해결되지 않은 공학적 문제가 산재하고 있다. 또 최근까지 개발된 매우 정교한 난류모델을 이용한다고 하더라도 이젝터 유동을 정확하게 예측하는 것은 대단히 어려우며, 이에 관한 연구결과는 아직까지 보고되지 않았다.

한편 수치계산의 경우 계산시간의 과다 및 비경제적인 연산비용 등으로 인하여 산업현장에서 이젝터를 용이하게 설계하는데는 어려움이 있다. 따라서 단순한 이론적 수단으로 이젝터 유동을 예측하고, 이젝터 시스템의 효과적 설계를 위한 실용적 자료가 매우 절실하게 요구되고 있다.

현재 저자들의 기체역학 실험실에서는 산업용 이젝터의 효과적 설계와 성능예측을 위한 실용적 프로그램을 개발하고 있다. 이들 프로그램은 1차원 기체역학 이론식들을 이용하여, 1, 2차 유동의 유량비와 이젝터 형상에 따른 각 부분의 치수를 입력하면 이젝터 전체 시스템의 성능과 효율을 예측할 수 있으며, 반대로 이젝터의 성능이 알려지는 경우 이젝터 시스템의 개략적 형상을 얻을 수 있도록 되어 있다. 이젝터 전체시스템의 성능은 이젝터의 상세 형상 및 작동압력비 뿐만 아니라 디퓨저의 손실, 1,2차 유동의 혼합손실 등 이젝터 내부에서 발생하는 유동과정에 의존하게 되므로, 이러한 인자들을 1차원 이론식에 포함시키기 위해서는 적절한 손실계수의 값들을 고려하여야 한다.

본 연구에서는 이러한 실용적 예측 프로그램의 검증을 위한 실험적 자료를 얻기 위하여, 증기로 구동되는 아음속/초음속 이젝터 유동을 실험적으로 조사하였다. 실험에서는 1차 구동 유체인 증기를 발생시키기 위하여 소형 보일러를 이용하였으며, 2차 유체로 대기 상태의 공기를 이용하였다. 실험결과들은 2차유동의 진공압력을 구하는데 활용되었다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에는 본 연구에서 이용된 실험장치 및 측정계통을 도식적으로 나타내었다. 증기보일러로부터 발생하는 과열증기는 상류정체실로 유입하여, 일단 정체상태를 회복한 다음 직경 20mm, 길이 200mm정도인 강재배관을 통하여 1차노즐로 유입하게 된다. 1차노즐로부터 방출되는 고속의 증기류는 이젝터 혼합부 및 디퓨저를 통과한 후 소음기를 거쳐 대기로 방출되도록 되어 있다.

이젝터 혼합부 상류에 위치한 이젝터 입구에는 직경 50mm의 배관이 설치되어 체적 약 $2m^3$인 2차 정체실과 연결되어 있다. 따라서 1차노즐로부터 증기가 방출되는 경우에 증기류의 전단작용과 1차노즐 출구에서 발생하는 감압작용으로 인하여 2차 유동인 공기가 흡인되어 이젝터를 통과하여 소음기로 유출되게 된다. 이 경우 2차 정체실의 압력은 대기압 이하로 떨어지게 되며, 2차 정체실에서 진공상태를 얻을 수 있게 된다.

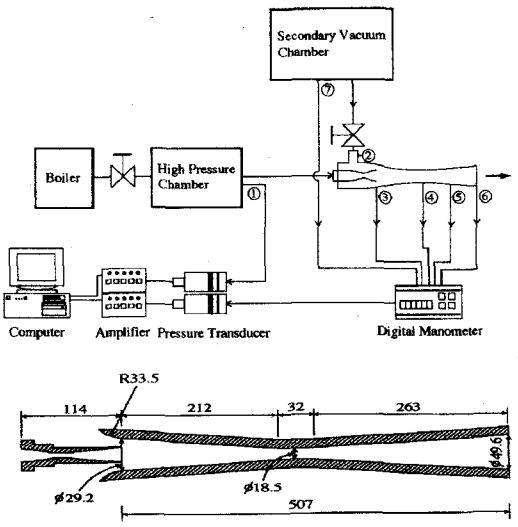


Fig. 1 Experimental facility

3, 4 그리고 5의 경우에는 초음속 이젝터가 된다. 본 연구에서 사용된 모든 노즐은 입구 직경 20mm, 길이는 114mm로 일정하며, 노즐 끝단 두께는 1mm로 일정하게 제작되었다.

아음속 노즐의 경우 노즐입구로부터 출구까지 단조로운 면적 감소형태로, Nozzle1 과 2는 각각 출구 직경이 9.25mm 및 13.1mm 이다. 또 초음속 노즐의 경우 노즐입구로부터 노즐목까지 직선적 단면적 감소형태 그리고 노즐 목으로부터 출구까지 직선적으로 단면적이 증가하는 형태이며, 노즐 출구 직경은 17.5mm로 동일하지만 노즐 목직경이 5.1mm, 5.8mm 그리고 6.9mm이다. 따라서 이 경우 이젝터 디퓨저의 확대각은 노즐목 직경과 출구직경에 따라 변화한다. 한편 1차노즐 외부의 형상, 이젝터 입구유로의 형상 및 기타 이젝터 형상은 모두 동일하게 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 1차 노즐의 공급압력을 P_{op}, 이젝터의 배압을 P_a(대기압)으로 하여, P_{op}/P_a를 이젝터의 작동압력비로 정의하였다. 실험에서는 이젝터의 작동압력비와 1차 구동노즐의 형상에 따른 2차 정체실 내부의 진공압력 변화를 조사하였다.

Fig. 4에는 Nozzle 1의 아음속 이젝터의 경우, 이젝터의 작동압력비 P_{op}/P_a의 변화에 따른 이젝터 내부의 각 측정점에서 얻어진 압력값을 나타내었다. 측정점 3은 이젝터 혼합부 입구, 4는 이젝터 목에서의 압력, 5는 디퓨저 벽면에서 압력 그리고 7은 2차 정체실내의 압력을 나타낸다. 그림으로부터 모든 측정점에서 압력값은 이젝터 작동압력비가 증가할수록 단조롭게 감소한다는 것을 알 수 있다. 구체적으로 2차 정체실 내부의 압력은 작동압력비가 증가할수록 감소하여, 작동압력비가 4.0으로 되는 경우에 1차노즐의 공급압력의 18% 정도로 된다. 그러나 그림의 결과로부터 2차 정체실의 압력은 이젝터의 작동압력비가 매우 커짐에 따라 무한히 낮아지는 것이 아니라 어느 일정값에 도달하게 된다는 것을 추측할 수 있다.

Fig. 5에는 Nozzle 3의 초음속 이젝터의 경우 이젝터의 작동압력비 P_{op}/P_a의 변화에 따른 이젝터 내부의 각 측정점에서 얻어진 압력값을 나타내었다. 그림의 결과로부터, 측정점 5에서 압력값을 제외하고는, 아음속 이젝터와는 달리 각 측정점에서 발생하는 압력값은 이젝터의 작동압력비가 증가할수록 단조롭게 감소하지 않는 것으로 나타난다. 측정점 4에서 압력값은 이젝터의 작동압력비가 증가함에 따라 감소하다가 어느 최소값을 가지게 된다. 또 측정점 3 및 7의 압력값으로부터 이젝터의 작동압력비가 9.0 이상으로 되면 거의 일정값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 측정점에서 압력변화는 이젝터 내부에서 발생하는 충격파와 이젝터 목에서 유동이 초크하는 현상에 기인하는 것으로 판단된다.

한편 그림의 실험값으로부터 Fig. 4에서 보인

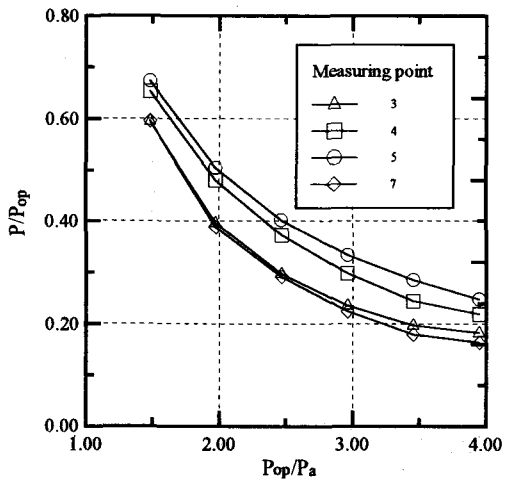


Fig. 4 Pressure variation in subsonic ejector system(Ejector throat area ratio : 4.0)

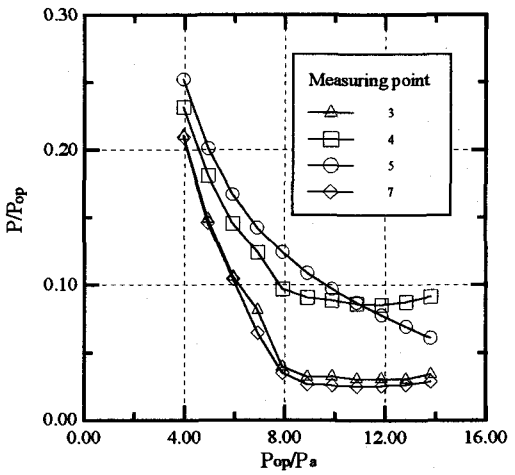


Fig. 5 Pressure variation in supersonic ejector system
(Ejector throat area ratio : 7.49)

바와 같이 2차 정체실에서 진공압력은 아음속 이젝터의 경우보다 초음속 이젝터의 경우가 훨씬 낮게 나타난다. 구체적으로 이젝터의 작동압력비가 9.0 이상으로 되면 2차 정체실에서 압력은 1차노즐의 공급압력의 3% 정도로 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 이젝터의 작동압력비가 높고, 2차 정체실의 진공도를 높이고자 하는 경우에는 아음속 이젝터보다는 초음속 이젝터가 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 본 연구에서 적용된 다섯 가지의 1차 구동노즐을 사용한 경우에 2차 정체실 내부에서 발생하는 진공압력을 비교하였다. 본 연구에서는 아음속 이젝터의 경우 작동압력비를 1.8에서 4.0까지의 범위에서 변화시켰으며, 초음속 이젝터의 경우 4.0에서 15.0까지의 범위에서 변화시켰다. Nozzle 1과 2의 아음속 이젝터의 경우와 Nozzle 3, 4 그리고 5의 초음속 이젝터 모두, 이젝터 작동압력비가 증가할수록 감소하여 어느 일정값에 점근하는 경향을 보였다. 그러나 작동압력비가 4.0인 경우 아음속 이젝터가 초음속 이젝터에 비하여 2차 정체실의 압력은 낮게 나타난다. 이것은 초음속 이젝터의 경우 낮은 작동압력비에서는 1차 구동노즐 내부에서 충격파가 발생하여 유동의 큰 손실을 야기할 뿐만 아니라 충격파와 경계층의 상호작용으로 인하여 노즐 벽면에서 경계층이 박리할 것으로 판단된다. 따라서 1차 노즐로부터 방출되는 유동의 전단작용 및 방출되는 증기유동의 압력강하가 크지 않게 되므로 2차 유동의 흡인작용이 작아지게 되기 때문으로 판단된다.

이젝터의 작동압력비가 4.0 이상의 영역에서 측정된 초음속 이젝터의 경우, 1차 구동 노즐의 형태와는 무관하게 이젝터의 작동압력비가 증가할수록 2차 정체실에서 압력은 낮아진다. 그러나 Nozzle 5의 초음속 이젝터의 경우 작동압력비가 4.0에서 10.0까지의 범위에서는 Nozzle 3 과 4의 초음속 이젝터에 비하여 2차 정체실에서 압력이 낮은 것으로 나타난다. 이러한 작동압력비의 범위에서 1차노즐 내부의 유동은 과팽창 상태로 된다. 또 Nozzle 5의 경우는 Nozzle 3과 4에 비하여 확대부의 확대각도가 작기 때문에 이러한 범위내 동일한 작동압력비에서 1차 구동노즐에서 발생하는 충격파는 상대적으로 약하게 된다. 따라서 노즐 출구에서 발생하는 유속은 Nozzle 3과 4에 비하여 더 크게 되므로 2차 유동의 흡입작용이 증가하게 되기 때문이라고 판단된다.

한편 이젝터의 작동압력비가 높은 15.0으로 되는 경우에 Nozzle 3의 초음속 이젝터의 경우가 Nozzle 5의 초음속 이젝터의 경우에 비하여 2차 정체실에서 압력은 낮아진다. 이것은 이젝터의 작동압력비가 높아지는 경우 1차 구동 노즐내부에서 발생하는 충격파가 노즐 출구에서 발생하게 되므로, 노즐 출구에서 유동 마하수가 클수록 흡인작용이 크게 되기 때문이다.

Fig. 7에는 이젝터 작동압력비의 변화에 따른 이젝터 목에서의 압력을 나타내었다. 그림의 결과로부터 아음속 이젝터와 초음속 이젝터가 동일하게 이젝터 목에서 발생하는 압력은 이젝터의 작동압력비가 증가할수록 단조롭게 감소하여, 작동압력비가 어느 정도 증가하게 되면 거의 일정값에 접근한다는 것을 알 수 있다. 이것은 이젝터 목에서 1차 증기 유동과 2차 흡인 공기의 혼합유동이 초크하게 되기 때문이다.

이와 같은 결과는 이젝터의 설계 예측 프로그

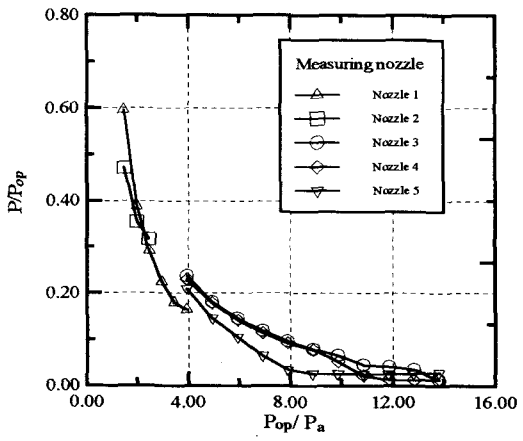


Fig. 6 Secondary chamber pressure

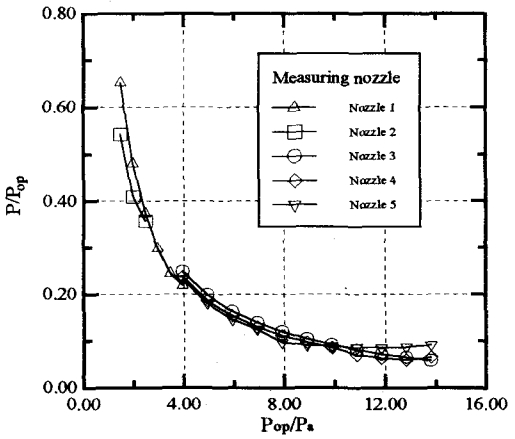


Fig. 7 Pressure in mixing tube

램을 검증하는데 매우 중요한 단서를 제시한다. 서론부분에서 전술한 바와 같이 1차원 기체 역학 방정식들을 이용하여 이젝터 유동을 해석하기 위해서는 1차 유동과 2차 유동의 혼합과정이나 점성마찰 효과들을 적절하게 고려하기 곤란하므로, 두 유동이 이젝터 목에서 완전히 혼합한다고 가정하게 된다. 이 경우 1차원 유동이론에 의하여 이젝터 목에서 발생하는 유동의 초크예측은 실제 유동과는 크게 달라질 수 있다. 본 실험의 결과로부터 이젝터 목에서 발생하는 유동초크를 이젝터의 작동압력비의 함수로 구한다면, 유동 예측 프로그램에 반영할 수 있게 되기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업용 이젝터의 효과적 설계와 성능예측을 위한 실용적 프로그램을 개발하기 위하여 증기로 구동되는 아음속/초음속 이젝터 유동을 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 아음속 이젝터에 있어서 이젝터 혼합부 입구 압력, 이젝터 목에서의 압력, 디퓨저 벽면에서 압력 그리고 2차 정체실내의 압력값은 이젝터 작동 압력비가 증가할수록 단조롭게 감소한다.

(2) 초음속 이젝터에 있어서 이젝터 목에서의 압력값은 이젝터의 작동압력비가 증가함에 따라 감소하다가 어느 최소값을 가지게 된다.

(3) 이젝터 목에서 발생하는 압력은 이젝터의 작동압력비가 증가할수록 단조롭게 감소하여, 작동 압력비가 어느 정도 증가하게 되면 거의 일정값으로 된다.

(3) 이젝터 목에서 발생하는 유동은 이젝터 작동 압력비만의 함수로 된다.

참고문헌

(1) Keenan, J. H., Neumann, E. P. and Lustwerk, F., 1950, "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," Journal of Applied Mechanics, Vol. 17, No. 3, pp. 299~309.

(2) Alperin, M. and Wu, J. J., 1983, "Thrust Augmenting Ejector, Part 2," AIAA Journal, Vol. 21, No. 12, pp. 1698~1706.

(3) Quinn, B., 1976, "Ejector Performance at High Temperatures and Pressures," Journal Aircraft, Vol. 13, No. 12, pp. 948~954.

(4) Francis, W. E., Hoggarth, M. L. and Templeman, J. J., 1972, "The Design of Jet Pumps and Injectors for Gas Distribution and Combustion Purposes," Symposium on Jet Pumps and Ejector, BHRA Fluid Engineering -Institution of Chemical Engineers, London, England, No. 6, pp. 81~96.

(5) Dutton, J. C. and Carroll, B. F., 1983, "Optimized Ejector-Diffuser Design Procedure for Natural Gas Vapor Recovery," Trans. of ASME, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 105, pp. 388~393.

(6) Nagahiro, J., Iwamote, J. and Higuchi, K., 1992, "Experiments for Fine Air Bubble Production in Liquids Using Ejectors," Trans. American Society of Agricultural Engineers, Vol. 35. No. 5, pp. 1581~1590.

(7) 今木淸康, 1980, "空氣調和工學," 産業圖書.

(8) Aiken, T. N., 1973, "Aerodynamics and Noise Measurements on a Quasi-Two-Dimensional Augmentor Wing Model with Lose-Type Nozzles," NASA TMX-62237, Sept.

(9) 化學工學協會, 1974, "化學工學便覽," 丸善.

(10) Lim, J. W. and Lee, S. H., 2000, "Engine Room Cooling System Using Jet Pump," KSME Spring Annual Meeting, Vol. B, pp. 162~167.

(11) Viets, H., Campbell, J. R. and Korkan, K. D., 1981, "Acoustic Interactions in Ejectors," AIAA Paper 81-2045, Oct.

(12) Knight, J., 1967, "The Use of Steam Ejector for the Vacuum Degassing of Steel, "Jour. IMech., Vol. 181, No. 10, pp. 225~239.

(13) Hsu, C. T., 1984, "Investigation of an Ejector Heat Pump by Analytical Methods," ORNL /CON-144, Oak Ridge National Laboratory, July.

(14) Kim, H. D., Setoguchi, T., Yu, S. and Raghunathan, S., 1999, "Navier-Stokes Computations of the Supersonic Ejector-Diffuser System with a Second Throat," International Jour. of Thermal Sciences, Vol. 8, No. 2, pp. 79-88.

(15) Kim, H. D., Lee, Y. K., Setoguchi, T. and Yu, S., 1999, "Numerical Simulation of the Supersonic Flows in the Second Throat Ejector-Diffuser Systems," Journal of Thermal Sciences, Vol. 8, No. 4, pp. 214~222.

(16) Choi, B. G., Lee, Y. K., Kim, H. D. and Kim, D. J., 2000, "Computations of the Supersonic Ejector Flows with the Second Throat," KSME Jour., Vol. 24, No. 8, pp. 1128~1138.

(17) Kim, H. D., 1999, "Shock Train and Pseudo-Shock Phenomena in Internal Gas Flows," Progress in Aerospace Sciences, Pergamon Press, Vol. 35, pp. 23~100.